

# 魚野川上流域における融雪流出解析

桼 村 欣 哉\*・早 川 典 生\*\*・中 村 由 行\*\*・後 藤 巖\*\*

## Snowmelt Runoff Study for Upper Uono River Basin

Kinya KASHIMURA, Norio HAYAKAWA, Yoshiyuki NAKAMURA and Iwao GOTO

The degree-day-factor (DDF) method is applied on the snowmelt runoff study for upper Uono River Basin with a catchment area of 355 km<sup>2</sup>. The input data are daily precipitation at 3 rain gauging stations and temperature data at one station, whereas the output data are daily runoff of Uono River. Runoff model used is a lumped catchment model which takes into effect a variable source area. Procedure of runoff calculation is as follows. Precipitation data is split into rain and snow according to temperature data. Rain is to be fed into the runoff model, while snow accumulates itself to become snow cover. If temperature is above freezing, snowmelt runoff is generated according to the DDF method.

There are two parameters in the snowmelt calculation, i.e. the degree-day-factor (DDF) and lapse rate of the temperature. The former is decided to fit the calculated runoff with the measured, while the latter is obtained from field temperature distribution. It was found that precipitation data during snowfall season has to be increased to obtain a good correspondence between calculated and measured runoff. This is also verified by referencing the calculated snowcover depth with snow depth survey data at nine stations. Furthermore a good correspondence is obtained by conjecturing snowfall increasing with elevation.

**Key words:** snowmelt runoff/degree-day-factor method

### 1. はじめに

日本海側の豪雪地帯における降雪量は、年間降水量の20～50%を占め、融雪による春期の高出水を引き起こす。この融雪出水は河川において長時間高水位をもたらすため、河床変動、内水問題、堤体や河川敷の耕作物などに与える影響は大きく、ひとたび氾濫が起ると被害は非常に大きなものとなる。しかし一方では、耕作期における灌漑用水や、発電用水、その他の公共用水として欠かせない割合を占めている。このため融雪流出機構の解明は、治水計画上的のみならず積雪を有効に利用する上で（治水、利水上）きわめて重要な課題である。

融雪流出の解析は、従来、現象を厳密に表わした熱収支に基づく理論的方法と、現象をブラックボックス的に取り扱う経験的方法とに大別することができる。

熱収支に基づく理論的方法は、その厳密性が高く評価されている。しかし実際の河川流域においては、融

雪に使われる熱エネルギーの指標となる気温、放射、湿度、風速などを全地域にわたって正確に観測、推定し難いこと、植生の分布、斜面の傾向や方向、標高差などが融雪量に複雑な影響を与えることからその適用は難しく、実用性に乏しい面がある。そこで一般には実用的な方法として、データの入力を気温と降水量だけとした気温日数法を代表とする、経験的方法が広く用いられている。

本研究では、得られる資料に制限があることから融雪計算に気温日数法を用い、標高、地域差による降積雪の分布を考慮して降雪－積雪－融雪の過程をモデル化し、流出過程に陸の「変動流出発生域を考慮した流出モデル」<sup>1)</sup>を用いて融雪流出の計算を行なう。

対象とした流域は、信濃川の支川である魚野川上流域の新潟県南魚沼郡六日町の水位流量観測所より上流の地域で、集水面積が355 km<sup>2</sup>の中規模流域である（図1）。

流域内には六日町、湯沢、清水に雨量観測所、湯沢に気温観測所、六日町に水位流量観測所がある。雨量観測所の観測機器は、六日町が自記雨量計、湯沢、清水を自記、普通両方の雨量計（但し湯沢の普通雨量計

原稿受付：昭和63年3月31日

\*株式会社鴻池組

\*\*長岡技術科学大学建設系

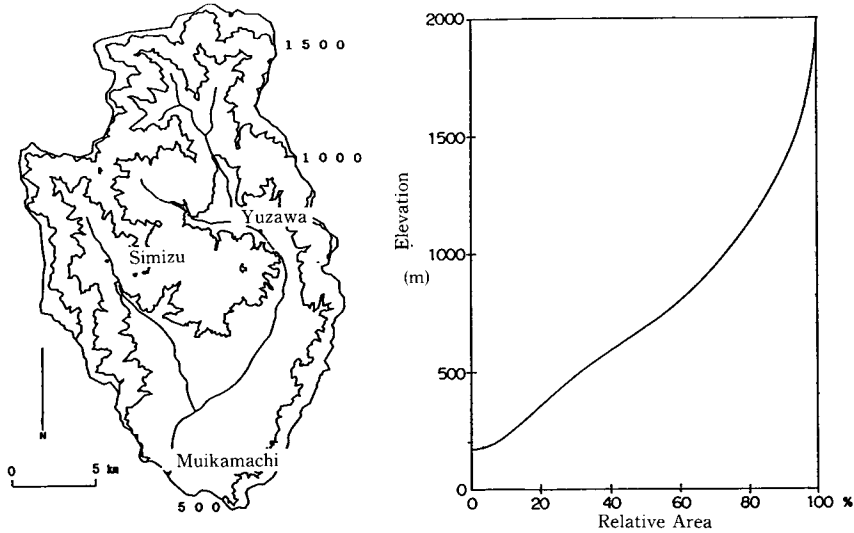


Fig. 1

は降雪時は観測を中止する)である。また、湯沢付近には発電所があって、清津川から取水し、魚野川に放流しており、その日平均流量は毎年最大で  $6.12 \text{ m}^3/\text{s}$  である。従って、流域の正味流量は六日町の流量からこの放流量を引いたものとなる。

用いたデータは、昭和 59 年 11 月～昭和 60 年 6 月のもので、入力データが流域内の六日町、湯沢、清水の午前 9 時～翌日の午前 9 時の日降雨量、及び湯沢の日平均気温、出力データが六日町における 0 時～24 時の

日平均流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) である。

## 2. 融雪流出モデル

対象流域はその地形が複雑であり、ひとつの観測点で流域の降水量を代表するのは危険なことから、積雪量の分布を考慮して、3つの観測点がその地域の降水量を代表するよう、図 2 中に太線で示すように 3 分した。

また標高の差が大きい (170～2026 m) ことから、気温の変化を考慮する必要がある、3 分した流域の各面積をさらに標高 100 m ごとの小面積に分割し、それぞれの高さにおける小面積での降雪量、積雪量、融雪量を求めるようにした。その過程のモデル化は以下に述べる通りで、モデルの概念図を図 3 に示す。

降水がある時は、その標高での気温が予め定めた値 (本研究では  $0 \sim 5^\circ\text{C}$ ) 以下であれば、降水は降雪と見なし、流出せずに積雪 (水当量  $\text{g}/\text{cm}^2$ ) として貯留される。また積雪がある時は、地熱による融雪水が生じ、気温が  $0^\circ\text{C}$  以上であれば、気温日数法に基づいた気温日融雪率 (degree-day factor 以下、DDF と記す) と降雨の潜熱に比例した融雪水が生じる。

この過程から得られた各小面積における融雪水量と降雨量を合計した水量を、流出モデルに入力して融雪流出計算を行なう。

降雪量及び融雪量の決定に重要な各標高での気温は、基準観測点 (湯沢) の気温と気温減率 (以下、 $\gamma$  と記す) より求めている。また、融雪量を最も左右するのは DDF であり、このモデルで主要となるパラメー

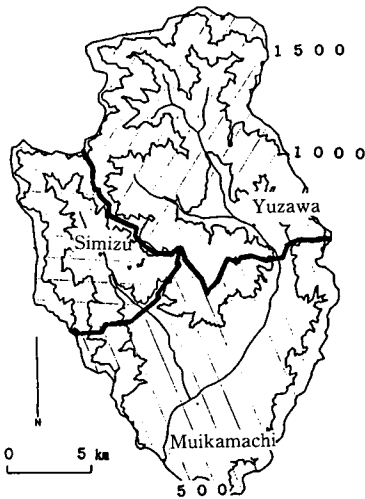


Fig. 2 Division of Catchment Area.

Table 1. Temperature Observation Stations and the Year Data is available (marked with ○)

NO	elevation	1976	1977	1978	1985
1	(m) 155	○	○	○	○
2	120		○	○	○
3	126	○		○	
4	140	○		○	○
5	148	○		○	○
6	190	○	○		○
7	195			○	○
8	220	○	○	○	○
9	230		○	○	○
10	260				
11	325	○	○	○	○
12	330	○	○	○	
13	433			○	
14	452	○	○		○
15	610	○			
16	830	○	○	○	

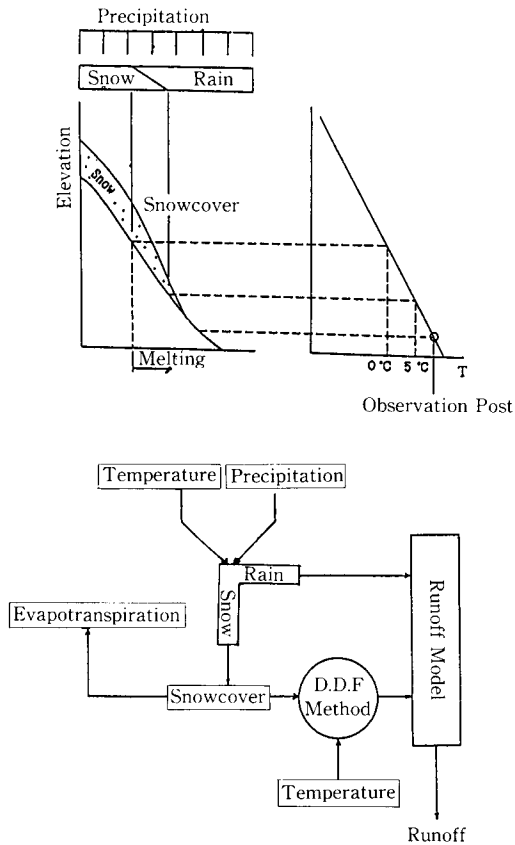


Fig. 3 Model of Snowfall-Runoff Process.

タは  $\gamma$  と DDF である。  $\gamma$  は、昭和 51～53 年度及び昭和 60 年度において、流域内外の 16 の小中学校 (図 4, 表 1) で観測された、積雪期 (12～3, 4 月) 毎朝 9 時の気温より得られた高度—気温の関係から、実際に求めたもので (図 5)<sup>2)</sup>、DDF は、解析における流出量を実測値に合うように、表 2 に示すように定めた (表 2)。

### 3. 積雪量

図 6 に融雪流出計算結果を示す。融雪期において流量の計算値が実測値と比較してかなり小さくなったのは、融雪期の出水に使われる程の積雪がモデル内に存在しなかったためだと思われる。そこでモデル内の積雪量 (水当量) を実測値と比較してみる。

融雪流出モデルにおける標高  $h$  での積雪量は、降雪の入力によって貯留された積雪から蒸発散と融雪による出力を引いた量で表わされる。この値を、図 7, 表 3 に示す積雪調査地点での積雪量と比較した。その結果

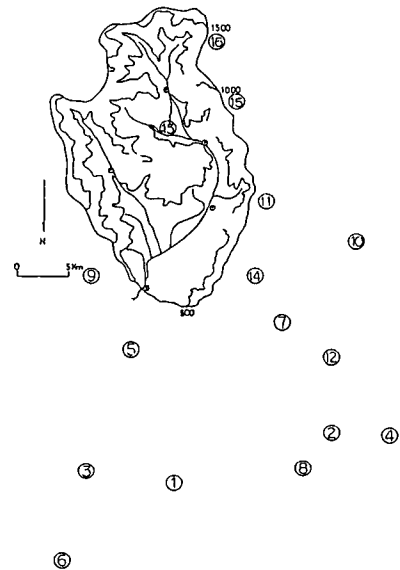


Fig. 4 Temperature Observation Stations.

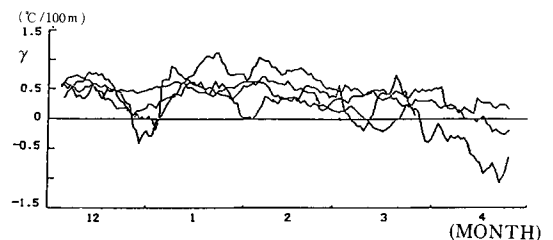


Fig. 5 Lapse Rate Calculated from Temperature Data.

Table 2. Degree-day-factor(DDF) and Lapse Rate( $\gamma$ ) used in the calculation

		~Feb.	Mar.	Apr.		May~
D.D.F. (mm/°C/day)	S. 60	2.0	3.5	5.5	6.0	7.0
	S. 61	2.0	2.0	3.0	4.0	5.0
	S. 62	2.0	2.0	3.0	3.0	—
$\gamma$ (°C/100 m)	S. 60	-0.50	-0.25	0.00	0.25	-0.50
	S. 61	-0.50	-0.25	0.00	0.25	-0.50
	S. 62	-0.50	-0.25	0.00	0.25	—

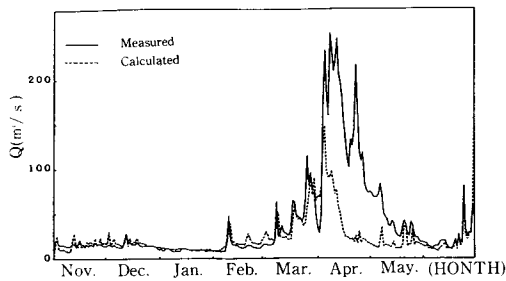


Fig. 6 Comparison of Daily Runoff.

の一例を図8に示す。

前述の予想通り、計算上の積雪量がかなり小さい値となっている。また、積雪調査を行なった日までの雨量観測所の累積降雪量が、そこに近い積雪調査地点で観測されたその日の積雪量よりも少ないという結果が生じている(図9)。

このことからモデルに入力される降水量は、実際に流域内に降る量よりも少ない(雨量観測所の降水量の値が流域を代表するものではない可能性がある)と考えられる。しかし無雪期間(降雨→流出)の計算では、このような不都合は生じなかったことから、降雨量についてはその限りではない。そこで、降雪量の入力が少ないと考えて、次式で観測降雪量の割増しを行なった。

$$PS_0' = PS_0 \times \alpha_1 \quad (1)$$

ここで、 $PS_0$  : 雨量観測所の降雪量 (mm)

$PS_0'$  : モデルに入力する降雪量 (mm)

$\alpha_1$  : 割増し係数

$\alpha_1$ は、雨量観測所の標高における積雪量の計算値が、そこと同標高にある(もしくはそこに近い)積雪調査地点での実測値と合うように(図10)求めたもので、その値は六日町で2.0、湯沢で1.5、清水で1.2である。

観測降雪量の割増しを行なった後、雨量観測所の標

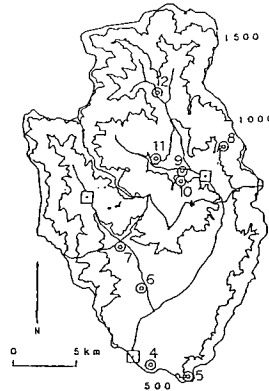


Fig. 7 Snowcover Survey Stations.

Table 3. List of Snow cover Survey Stations

	elevation
No. 4	190 m
No. 5	510 m
No. 6	200 m
No. 7	370 m
No. 8	600 m
No. 9	400 m
No. 10	550 m
No. 11	500 m
No. 12	600 m

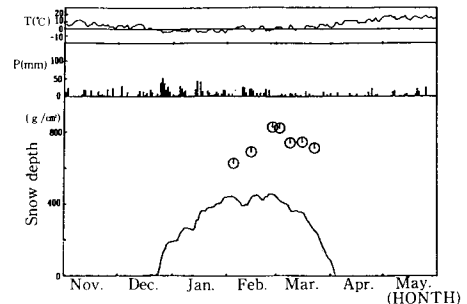


Fig. 8 Comparison of Snowdepth Calculation (Solid line) with Measured Data at Stn. 9.

高よりも高い積雪調査地点での積雪量と、その標高の計算積雪量の比較を(例えば、六日町とNo.5で)行なった。

結果の一例を図11に示す。いずれの場合も計算値は実測値よりも少ないものとなった。ここで問題となるのは、融雪がほとんど生じない時期(2月ごろ)からこ

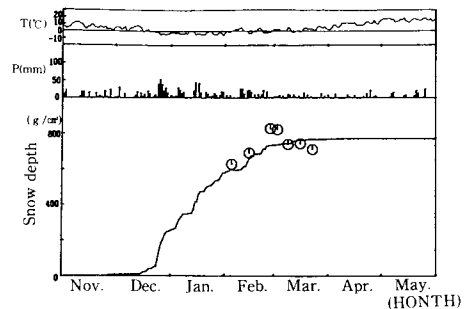


Fig. 9 Comparison of Accumulated Snowfall Calculation (Solid line) with Measured Snow depth.

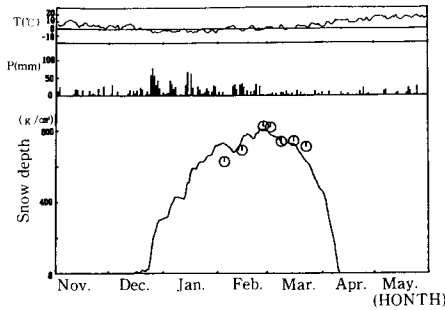


Fig. 10 Comparison of Calculated Snowdepth (Solid line) with Corrected Precipitation Data with Measured at Stn. 9.

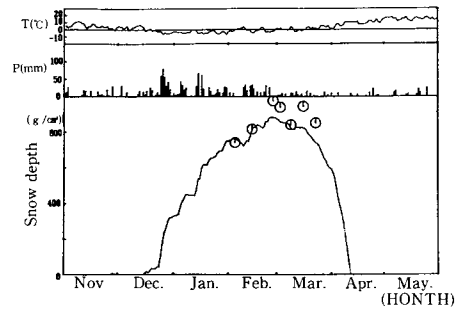


Fig. 11 Comparison of Calculated Snowdepth (Solid line) with Corrected Precipitation Data with Measured at St. 10.

の値の差がついているということである。積雪量は、降雪の貯留から融雪分を差し引いたものであって、融雪のない時期からその値が少なく計算されるということは、降雪の絶対量が足りないということである。従って、標高が高いほどその降雪量は多くなると考えて、次式によって標高差による降雪量の割増しを行なった。

$$PS_h = PS_0' \times ((h - h_0)/100 \times \alpha_2 + 1) \quad (2)$$

ここで、 $h$  : 標高 (m)

$PS_h$  : 標高  $h$  での降雪量 (mm)

$h_0$  : 雨量観測所の標高 (m)

$\alpha_2$  : 標高差による降雪の割増し率

$\alpha_2$  は、どの標高  $h$  の積雪調査点においても、積雪量の計算値と実測値が合うようにして求めたもので、その値は 0.03 である (図 12)。

#### 4. 融雪流出計算

前節の降雪量の割増しを導入した計算結果を図 13 に示す。図 6 と比較して精度は上がっているが、融雪終期の流出が持続せず、計算期間の流出量の合計も実

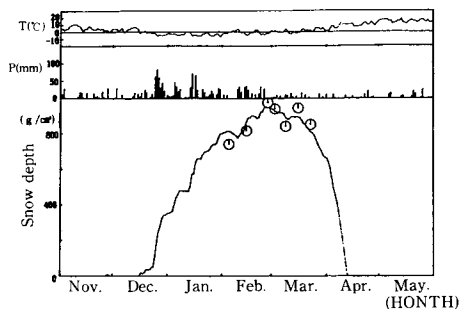


Fig. 12 Comparison of Calculated Snowdepth (Solid line) with Enhanced Precipitation at high altitude with Measured at Stn. 10.

測値よりまだ少ない。また、降水と流出の比較、いわゆる水収支も合わないことから、標高の高い点での積雪量が不足していると考えられる。しかし、標高 600 m までの積雪量は、実測値との比較によって不足していない状態にしたことから、標高差による降雪量の割増しは線形ではないと考えて、調査地点のない標高 600 m 以上の点での降雪量  $PS_h'$  を次式で仮定して流出計算を行なった。

$$PS_h' = PS_h \times ((h - 500)/100 \times \alpha_3 + 1) \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_3$  : 標高 600 m 以上の点での

標高差による降雪の割増し率

$\alpha_3$  は、計算期間の水収支を合わせることににより求めたもので、その値は 0.06 である。結果を図 14 に示す。全体的によく一致したものとなった。

#### 5. モデルの検証

ここまでは、昭和 59 年 11 月～昭和 60 年 6 月のデータを用いて流出計算を行なったが、パラメータを試行錯誤で求めたものが多いことから、その安定性やモデルの妥当性については疑問が残る。そこで、昭和 60 年 11 月～昭和 61 年 6 月及び昭和 61 年 11 月～昭和 62

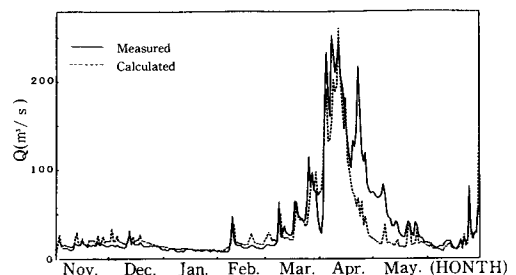


Fig. 13 Comparison of Daily Runoff with corrected Precipitation.

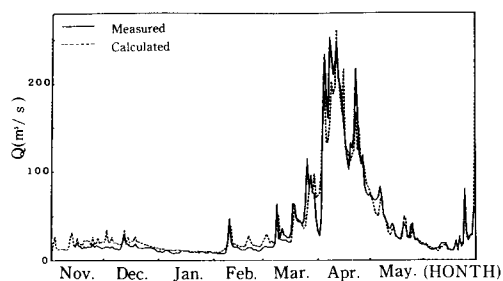


Fig. 14 Comparison of Daily Runoff (Prediction is calculated with correction at low altitude and nonlinear increase at high altitude).

年4月の期間のデータを用いて積雪及び融雪流出モデルの検証を行なう。

積雪量計算結果の一例を図15に示す。2ケース共、融雪がほとんど起きない2月末までの積雪量の計算値は、実測値とよく一致している。従って、降雪量の割増しの値( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ )については、このモデル特有ではあるが、過小評価された降雪量の影響を除去する安定したパラメータであると思われる。一方、3月～4月にかけてのS. 60～61のケースでは、計算値が実測値よりも少なめで、終雪時期が早過ぎる事から融雪のパラメータ(DDF,  $\gamma$ )は安定していないと思われる。

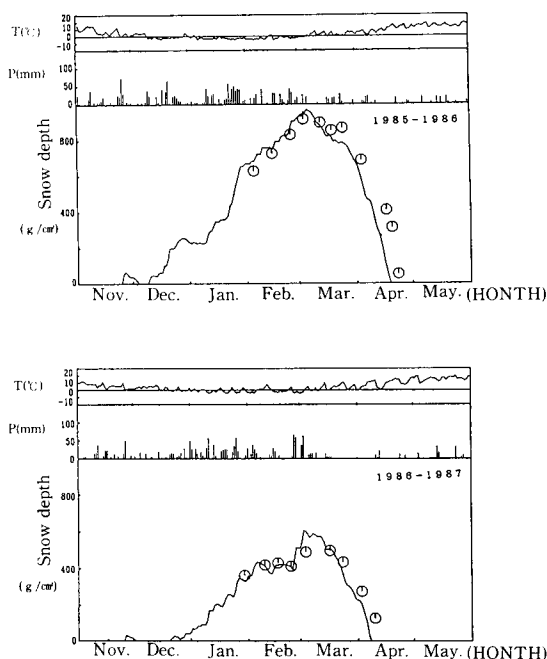


Fig. 15 Comparison of Snowdepth Calculation (Solid line) with Measured at Stn. 9.

融雪のパラメータについて、 $\gamma$ は(4年間の平均値ではあるが)実際に求めた値であることから変動がないと見ると、融雪が始まる時期のDDFを毎年一定とするのは無理である。そこで、融雪期のDDFのみを表2の値に仮定して、計算した結果が図16である。全体的によく一致したものとなった。

融雪流出計算結果を図17に示す。積雪量と同様3,4月の流出量が過大となり、融雪終期の流出が少なくなってしまう。そこで、前記同様DDFを変更した(値も同じ)結果が図18で、全体的によく一致したものとなった。また、融雪終期まで流出量が持続していることから、標高差による降雪量の割増しの値( $\alpha_3$ )もこのモデル特有の安定したパラメータであると思われる。

以上のように本研究ではDDFを計算流出量が実測流出量に合うように逆算して求めた。一般にDDFの値は幅があり、0.7～8.0 mm/°C/dayの値をとるとき、融雪の初期には小さく以後次第に大きくなることが知られており<sup>3)</sup>、本研究で採用した値はこの傾向に一致している。また、Martinec<sup>4)</sup>は積雪の密度 $\rho_s$ (g/cm³)との間に以下の関係式を提唱している。

$$\text{DDF} = 11 \rho_s \quad (4)$$

$\rho_s$ は0.3～0.6であるので、表2の値は式(4)により得ら

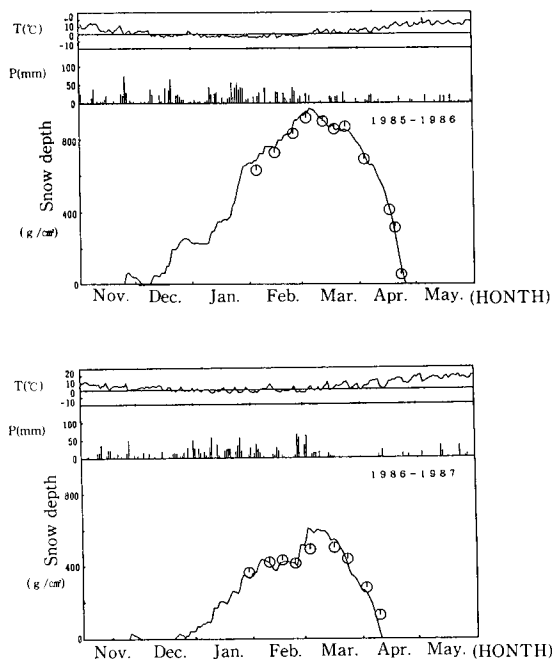


Fig. 16 Comparison of Snowdepth Calculation (Solid line) with Measured at Stn. 9.

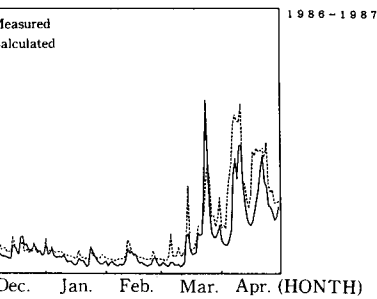
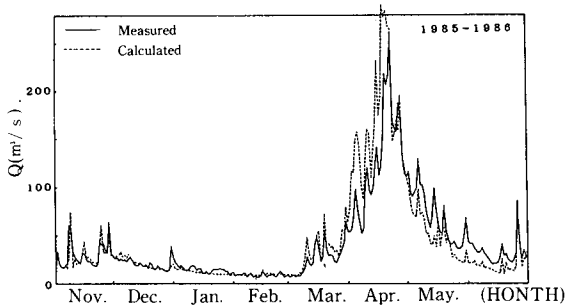


Fig. 17 Comparison of Daily Runoff.

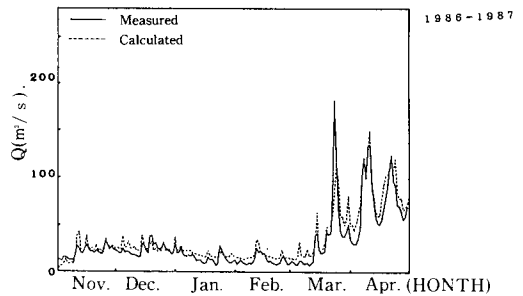
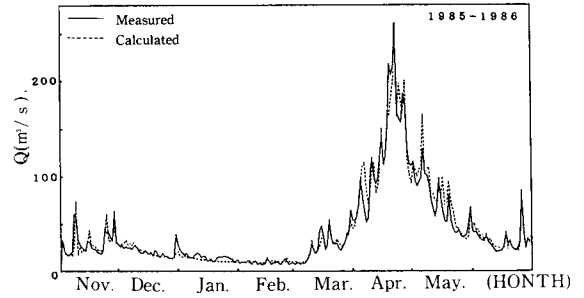


Fig. 18 Comparison of Daily Runoff.

れる値と近い値となっている。

## 6. 結 論

魚野川上流域において、融雪過程に気温日数法を用いた融雪流出モデルを作成し、計算を行なった結果、以下に述べる結論を得た。

### (1) 積 雪 量

(a) 実測値との比較から対象流域内の降雪量観測値は実際より低めの値を示している。

(b) モデル内で観測降雪量の割増しをすることによって、観測所と同地域（同標高）での積雪量を精度良く予測することができる。この時の割増しの値は、六日町で2.0、湯沢で1.5、清水で1.2となる。

(c) さらに割増しされた降雪量を標高500 mまでは100 m上がる毎に3%増加させることによって、流域内各標高の積雪量を予測することができる。

### (2) 流 出 量

(a) 積雪量計算に用いられた降雪量の割増しを導入することによって、融雪流出を融雪終期を除いては精度良く予測することができる。

(b) さらに標高600 m以上の降雪量を100 m上がる毎に6%増加させることによって、融雪終期についても融雪流出計算の精度が向上する。

### (3) 融雪のパラメータ

本研究に用いた融雪のパラメータは、対象流域内に

おける毎年の傾向として、以下の特徴を持っている。

(a)  $\gamma$  は4月に符号が逆転する。

(b) DDFはその値が融雪時期では年によってやや違うものの、融雪初期から終期にかけて徐々に大きくなるという、一般的に言われている傾向と同じになる。また融雪期前の値は安定しており、その値は2.0 mm/°C/dayである。

### (4) 水 収 支

流域内における水収支の不均衡は、主に降雪量の過小評価に原因があると考えられ、降雪量の割増しを行なうことによって改善される。

謝辞：貴重な資料を御提供いただいた建設省北陸地方建設局 信濃川工事事務所に深甚なる謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 陸 旻皎：変動流出発生域を考慮した流出モデル，長岡技術科学大学修士論文，1985
- 2) 松田康治：魚野川上流域における融雪流出解析，長岡技術科学大学卒業論文，1987
- 3) 土木学会：水理公式集，1985，p. 168
- 4) Martinec, J.: Snowmelt-Runoff Model for Stream Flow Forecasts, Nordic Hydr. Vol. 6, 1973, p. 146